

# 한국 토종 원자로 'SMART' 의 오늘과 내일

Today and Tomorrow of the Korea-made NPP, SMART



글 | 金學魯  
(KIM, Hak Roh)

· 한국원자력연구원  
SMART개발본부장

E-mail: hrkim@kaeri.re.kr

Nuclear energy in Korea began in 1958, when the Korea's atomic energy act was formulated and the relevant organizations were founded. Since then, notwithstanding the two catastrophe like TMI and Chernobyl accident, Korea made a wise decision to expand the peaceful uses of the nuclear energy as well as to localize the essential nuclear design technology of fuel and nuclear steam supply system. This decision resulted in the success of export of nuclear power plants as well as research reactor in 2010s. The Korea's nuclear policy, which well utilized 'international crisis in nuclear business' as 'opportunity of Korea to get nuclear technology', is believed nice policy as a role model of nuclear new-comer countries. Based upon the success story of localization of nuclear technology, Korea had an eye for a niche market, which was a basis of development of SMART, Korea-made integral PWR. The operation of a SMART plant can sufficiently provide not only electricity but also fresh water for 100,000 residents. Last two years, Korea's nuclear industry team led by the Korea Atomic Energy Research Institute completed the standard design of SMART and applied to the Korea's regulatory body for standard design approval. Now the Korea's licensing authority is reviewing the design with the relevant documents, and the design team is doing its best to realize its hope to get the approval by the end of this year. From next year, the SMART business including construction and export will be explored by the KEPCO consortium.

## 서론

2011년 3월 발생한 일본 후쿠시마 원전의 사고로 인하여 원자력 기술의 평화적 이용에 있어 큰 오점과 경각심을 불러일으킨 해로 세계인은 2011년을 오래도록 기억할 것이다. 그럼에도 불구하고 원자력기술의 후발 보유국인 우리 대한민국은 세계에서 가장 안전하게 원자력을 이용하고 있는 국가로 평가받고 있다. 이는 국가적으로 연구개발, 설계, 제작, 시공, 운영 등에 대해 역할 분담을 명확히 하고, 각 주체가 모든 역량을 결집하여 최선을 다해온 결과로 이해된다. 소련이 1954년 6월26

일 Obnisk 원자력발전소로부터 전기를 세계 최초로 송전하기 시작하였고, 영국은 Calder Hall 발전소를 1956년 10월 17일, 미국은 Shippingport 원자력발전소를 1957년 12월 18일 각각 운전 개시하였다. 1978년 3월 28일 미국에서 발생한 TMI 원전사고가 일어나기 이전까지 원자력기술을 보유한 국가를 중심으로 원자력발전소의 건설 붐을 일으켰고, 석유파동은 세계 각국의 에너지 안보 문제를 제기하게 되어 원자력의 의존도를 더욱 키우게 되었다. 그러나, 1986년 4월 26일 우크라이나에서 발생한 Chernobyl 원전 사고는 원전을 기피하게 하는 기폭제 역할을 하였다.

우리나라는 70년대 초, 고리 1호기의 도입 결정 이후 지속적으로 원자력의 이용을 확대시켜 왔고 80년대 중반에는 핵연료 국산화와 원자로 설계기술 국산화 정책을 펼치게 되어 세계적인 '원자력침체기'의 위기를 전화위복의 기회로 활용하는 지혜로운 정책결단에 힘입어 최단기에 기술 국산화에 성공하였다. 공학적으로 성숙기술인 원자력이 기후변화와 에너지안보를 위한 불가피한 선택이라는 분위기가 1990년대 후반부터 조성되며 원자력 르네상스 시대가 예고되었다. 그러나, 올해 3월 11일 대형지진과 설상가상으로 뒤이어 덮친 쓰나미라는 자연재난에 의해 야기된 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고는 향후 원자력의 이용에 있어 모든 대중이 안심하고 선택할 수 있는 원자력에너지를 생산할 수 있는 기술만이 살아남는 환경을 조성하고 있다. 대중으로부터 외면당하는 기술은 시장에서 퇴출될 수밖에 없다.

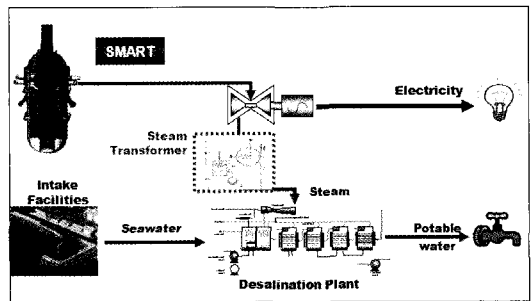
### SMART 원자로

우리나라는 1990년대 후반부터 원자력에너지 활용의 다변화에 관심을 가지고 전력기반이 취약한 개발도상국, 분산전원 및 물부족 지역을 대상으로, 소규모 전력생산과 함께 해수담수화를 위한 에너지를 동시에 공급할 수 있는 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로를 우리의 고유 기술로 개발하였다. 원자로압력용기의 제작성을 고려하여 현재 개발된 SMART의 열출력은 330MWt로, 9만 킬로와트의 전력과 하루 40,000톤의 담수를 인구 10만의 도시에 동시에 공급할 수 있는 규모이다.

SMART는 핵연료 및 노심, 8개의 증기발생기,

1개의 가압기, 4대의 사류형 냉각재펌프와 원자로 내부구조물이 한 개의 원자로 압력용기 내에 설치되는 신개념의 일체형원자로이다. 나선형 증기발생기는 노심상단의 노심지지통과 원자로용기 사이의 환형공간에 설치되며, 가압기는 원자로용기 상단의 돔 부위에 위치하고 있고, 원자로 냉각재펌프는 원자로용기의 측면에 수평으로 설치되어 있다.

노심에서 가열된 냉각재는 노심지지통을 따라서 상승한 후에 원자로의 반경 방향에 위치한 원자로냉각재펌프에 의해 강제순환 된다. 냉각재는 증기발생기를 통하여 이차측에 열을 전달한 후, 유동혼합집합체를 통하여 다시 노심의 하부로 들어감으로써 전체 순환회로를 형성한다. 따라서 냉각재의 순환회로가 매우 짧으며 또한 냉각재의 원자로 외부순환이 없으므로, 별도의 대형 냉각재 배관이 필요없는 특징을 갖는다.

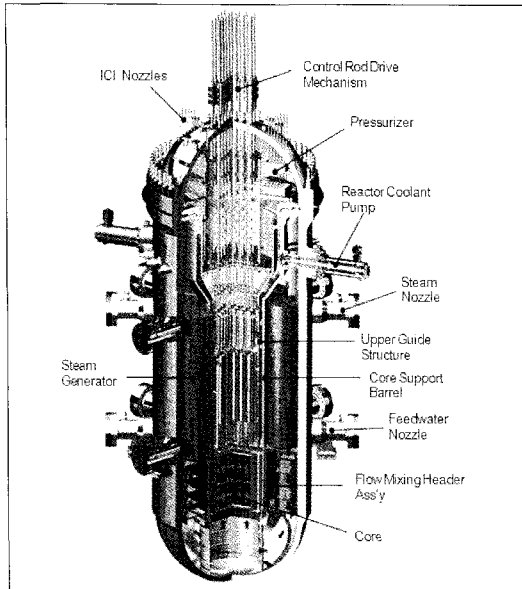


〈그림 1〉 SMART의 활용

또한, SMART의 디지털 감시 및 보호계통 등 혁신적 제어기술은 원전의 운전안전성 뿐만 아니라 원전의 가동률을 향상시킬 수 있다. SMART의 제어계통은 완전 디지털 계통으로 하향식 계층구조 설계기법을 적용하여 최상위준위인 제어실준위의 기능을 완전하게 수행할 수 있도록 센서 및 계측계통, 공정 및 감시계통, 보호계통, 통신망계통 등이 통합적이고 일관된 설계개념에 따

라 개발되었다.

원자로의 안전성 향상은 막대한 두려움의 대상인 원자력에너지에 대한 국민적 신뢰를 확보하기 위한 필수 요소이다. SMART는 일체형원자로 개념 도입으로 물의 재고량이 풍부할 뿐만 아니라 대형배관을 제거함으로써 대형배관 파손에 의한 사고 위험과, 캔드모터 원자로냉각재펌프를 사용함으로써 펌프밀봉의 파손으로 인한 사고 위험을 제거하였다. 또한, 낮은 원자로 출력밀도와 큰 용량의 가압기는 사고 시 원자로 스스로가 사고에 대응하는 능력을 크게 증가시켰다. 이러한 고유안전성과 더불어 피동잔열제거계통과 능동 안전계통을 도입하고, 디지털 원자로감시 및 보호계통, 비상전원계통 등을 갖추었으므로, 안전성을 상당히 향상시켰다.



〈그림 2〉 SMART 원자로계통

## SMART의 오늘

원자로의 개발에 있어서 안전성의 확보는 무엇보다 중요하며, 이를 위하여 적용된 기술의 검증은

개발과정에서 가장 필수적인 부분이다. 표준설계 인가 제도는 반복적 건설이 주요 대상이지만, 특정 부지 대신에 포괄부지 특성이 반영되어 설계되므로 새로이 개발되는 원자로를 건설하지 않고 안전성과 성능을 객관적으로 공인받는데 활용될 수 있다. 우리나라는 원자력법 제12조의2에 표준설계인가와 관련된 규정을 마련해 놓고 있다. 우리 정부는 SMART를 수출전략상품으로 활용할 목적으로 2009년부터 3년 동안 표준설계를 완성하고 규제기관으로부터 인가를 받는 사업을 지원하고 있다. 이에 따라 한국원자력연구원(이하 '원자력(연)')은 조기사업을 위한 투자자 유치 활동과 병행하여 사업계획을 수립하고 사업을 분담하여 수행할 추진 체계를 갖추는 등 다양한 노력을 기울였다. 그 결과 2010년 6월 14일 국내 13개 기업이 참여하는 한전 컨소시엄과 1000억원의 투자협약을 체결하였다. 한전컨소시엄은 SMART 표준설계인가 획득 이후, 2012년부터 SMART 수출시장 개척과 건설을 주도한다.



〈그림 3〉 SMART 사업을 위한 컨소시엄

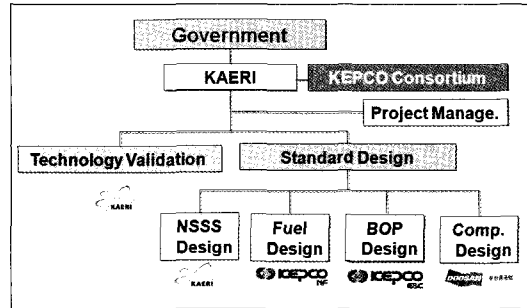
SMART 표준설계는 원자력(연)의 주관으로 국내 최고의 기술역량을 확보한 기술집단과 설계 세부역무를 분담·수행하여 왔다. 즉, 원자력(연)이 핵중기공급계통(NSSS: Nuclear Steam Supply System)의 설계를 담당하고, 한국전력기술(주)가

플랜트종합설계(BOP: Balance of Plant)를, 한전 원자력연료(주)가 핵연료설계를 담당하며, 원자력기기공급업체인 두산중공업이 기기의 제작성 검토 등을 수행하고 있다.

원자력법에 따라 표준설계인가를 획득하기 위해서는 표준설계의 완성 뿐만 아니라 설계에 사용되는 새로운 설계자료, 설계코드, 설계방법론, 그리고 SMART 고유기기 및 계통의 성능과 안전성에 대한 검증이 요구된다. 무한경쟁 체제인 해외 수출 시장의 진입에 필수적인 SMART 표준설계인가의 조기 획득을 위하여 원자력(연)은 상당히 높은 리스크를 감내하며 검증업무와 설계역무를 병행 추진하고 있다.

SMART 설계에는 인허가 부담을 줄이기 위하여 현재까지 상용원전에 적용되어 입증된 기술을 가능한 한 많이 채택하였다. SMART 표준설계인가 과정에서 도출될 수 있는 인허가 현안을 조기에 해결하기 위하여, SMART의 핵심 설계 및 안전성에 대한 인.허가 심사기관의 사전안전성심사가 2010년 완료되었다. 사전안전성심사 결과를 반영한 SMART 표준설계를 완료하고, 2010년 12월 30일에는 원자력법 제12조의2항에 따라 원자력(연)-한전 공동으로 표준설계인가를 신청하였다. 표준설계안전성보고서, 표준설계기술서, 비상운전절차서작성계획서 등 인가신청에 요구되는 법적 서류가 제출되어, 현재 인·허가 심사기관의 서류 적합성 판정을 받은 후 본 인·허가 심사가 진행 중이다. 이들 서류에는 지난 2년여에 걸친 사업참여자의 열정과 땀이 배어있다고 자부한다. 지난 4월말 1차심사 결과 932건의 심사질의서를 접수하여 5월말 각각에 대한 답변서를 제출한 바 있으며, 7월 말엔 470건의 심사질의서를 접수한 뒤 8월말 답변한

바 있다. 현재에도 심사기관은 SMART의 안전성에 대한 객관적 공인을 위하여 철저히 심사하고 있으며, 원자력(연)을 비롯한 사업수행기관은 기 계획된 대로, 금년 말까지 SMART 표준설계인가 획득을 위해 모든 역량을 결집하여 대비하고 있다.



〈그림 4〉 SMART 사업 추진체계

### SMART의 안전성

지난 3월 11일 일본 후쿠시마 원전 사고는 많은 일반 대중에게 원전의 위험성을 가장 크게 각인시키는 계기가 되었다. 원자로 건물의 폭발장면을 반복 보여줌으로써 일반대중이 핵폭발과 원자력발전소의 수소 폭발을 혼동하게끔 되었다. 만일, 최고의 안전성 확보를 목표로 설계한 SMART에 후쿠시마 규모의 지진이 발생하고 뒤 이어 쓰나미가 덮쳐올 경우 SMART는 과연 안전할 것인가? 답은 '안전하다'이다. 염려할 필요가 없는 '안심' 원자로로 설계하고 있는 SMART이기에 가능한 답변이다.

우선 지진이 발생하여 모든 전원이 상실되면 운전중인 SMART도 당연히 정지된다. 이어 2대의 비상디젤발전기가 구동되어 안전주입계통이 작동되며, 이와 별도로 전원 없이도 순수히 자연현상인 자연대류에 의해 피동간열제거계통이 작동 작동되어 원자로의 잔열을 제거하게 된다. 일

본의 경우와 같이 쓰나미에 의해 비상디젤발전기의 작동이 멈춰진다고 해도 피동잔열제거계통에 의해 원자로의 안전정지상태는 지속적으로 유지될 수 있다. 그렇다면 숫자가 무의미할 지 몰라도 발생확률이  $10^{-9}$ /년 이하인 피동잔열계통도 작동하지 않을 경우엔 어찌될까? 원자로압력용기내의 냉각재 재고량이 많아 62시간 동안은 운전원이 아무런 조치를 취하지 않아도 원자로를 안전하게 유지할 수 있다. 62시간 이후에 원자로의 핵연료 피복관이 수증기와 모두 반응하여 수소가 발생한 다하더라도 원자로격납건물 내의 수소농도가 폭발 농도에 이를 수 없으며, 원자로 격납건물 내에는 수소를 자동으로 제거할 수 있는 피동형 수소 재결합기가 적정위치에 설치되어 있으므로 수소 폭발은 절대로 일어나지 않는다. 또한, 핵연료장전량이 상대적으로 적어 비상계획구역의 설정도 기술적으로는 불필요하게 되어, 법 규정의 재해석과 주민이 동의할 경우, 생활지 인근에도 건설할 수 있을 정도의 안전성을 확보하고 있다. 이와 같이 SMART는 심층방어(defence-in-depth) 원칙과 입증기술(proven technology)을 바탕으로 일체형원자로의 장점을 살려 설계된 '안심' 원자로이다.

## SMART의 내일

우리나라는 1958년 원자력법을 제정한 뒤 원자력의 평화적 이용에 대해 국가적인 노력을 기울여 왔다. 국가의 관심과 사랑으로 키워온 대한민국의 원자력기술은 국내에 값싼 전력을 공급함으로써 산업경쟁력에 크게 이바지함은 물론 원전 4기의 UAE 수출, 연구용원자로의 요르단 수출 등 국가 신성장 동력으로 우리나라의 성공신화를 쓰고 있다.

몽골, UAE, 카자흐스탄, 알제리, 나이지리아 등 개발도상국은 SMART의 도입 및 기술협력에 지대한 관심을 표명하고 있으며, 미국이나 캐나다 등 선진국의 기업도 SMART를 이용한 산업전기 및 열이용에 관심을 보이고 있다. IAEA 등 해외 전문기관들도 현재 SMART의 설계수준이 같은 종류의 원전 중 세계에서 가장 앞서있다고 평가하고 있다. 따라서, 후쿠시마 원전 사고 이후 온 세계가 원자력의 이용에 주춤거리고 있는 이 '위기' 를 우리의 '기회' 로 다시 한번 최대한 활용하여, 원자력기술을 국민 먹거리로 도약시켜야 하며 SMART도 이에 동참해야 한다. 이를 위해 사업화 능력이 탁월한 한전 컨소시엄에 참여하는 국내기업의 역할이 무엇보다 크다고 본다. 올해 말의 표준설계인가 획득은 SMART 수출 성공신화의 첫 단초를 제공하는 발판이 될 것이다. 원자력(연)을 중심으로 우리 원자력계는 한국의 원자력 역사에 '순수 토종 안심원자로' 를 탄생시키는 방점을 찍을 수 있도록 최선을 다하고 있다.

이 기고에서는 순수 토종 한국기술로 개발해온 SMART의 개발 배경과 현주소, 기술적 특성과 앞으로의 전망에 대하여 간략히 정리하였다. SMART의 표준설계인가를 차질없이 완수한 뒤 한전 컨소시엄에 SMART의 기술을 이전함으로써 개발자로서 원자력(연)의 주도적 역할은 마무리 될 것이다. 우리 원자력(연)은 향후 한전 컨소시엄이 주도하는 건설 및 해외수출 사업화에 기술종결자(total solution provider)로서 기여 동참하여, SMART 수출 성공신화를 이루도록 최선을 다할 것이다.

(원고접수일 2011년 10월 11일(화))